

## Система беспроводной передачи энергии

И. Б. Широков ✉, И. В. Сердюк, А. А. Азаров, Е. И. Широкова

Севастопольский государственный университет,  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

✉ shirokov@ieee.org

### Аннотация

Рассмотрены вопросы беспроводной передачи энергии на малые расстояния. Подход может быть применим для беспроводной зарядки батарей беспилотных транспортных средств. Предлагается для передачи энергии использовать технику микрополосковых структур. При приближении микрополосковых структур друг к другу с лицевой части они образуют направленный ответвитель на симметричных полосковых линиях. Длина линий взаимодействия выбирается в несколько раз большей, чем четверть длины волны. Балластные сопротивления из схемы исключаются. Такой подход приводит к малым потерям передачи энергии при изменении расстояния между микрополосковыми структурами в широких пределах. Осуществлено моделирование работы системы передачи энергии, изготовлен экспериментальный образец и проведены экспериментальные исследования. Моделирование и эксперимент хорошо согласуются друг с другом.

### Ключевые слова

беспроводная передача энергии, микрополосковые структуры, направленный ответвитель, коэффициент стоячей волны

### Для цитирования

Широков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И. Система беспроводной передачи энергии. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):7–20. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.001.

## System for wireless power transfer

I. B. Shirokov ✉, I. V. Serdyuk, A. A. Azarov, E. I. Shirokova

Sevastopol State University,  
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russia

✉ shirokov@ieee.org

### Abstract

The issues of wireless power transfer over short distances are considered. The approach may be used for wireless charging of batteries in unmanned vehicles. It is proposed to use the technique of microstrip structures for power transfer. The microstrip structures form a directional coupler on

symmetrical strip lines when approaching by front parts. The length of the interaction lines is chosen several times longer than a quarter of the wavelength. Ballast resistors are excluded from the circuit. This approach leads to small losses of power transfer when the distance between microstrip structures changes over a wide range. Modeling of the operation of the power transfer system has been carried out, an experimental sample has been made and experimental studies have been carried out. The simulation and experiment are well accorded.

### Keywords

wireless power transmission, microstrip structures, directional coupler, standing wave ratio

### For citation

Shirokov I. B., Serdyuk I. V., Azarov A. A., Shirokova E. I. System for wireless power transfer. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):7–20. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.001.

## Введение

Электротранспортные системы стремительно развиваются во всем мире. В последнее время очень популярными являются системы беспроводной подзарядки аккумуляторных батарей, которые широко используется во всех сферах жизни человека. Одной из основных задач, решаемых данного рода системами, может являться подзарядка аккумуляторных батарей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Потребление электроэнергии двигателями приводит к быстрой разрядке аккумулятора. Стремление к увеличению полезной нагрузки приводит к уменьшению веса батарей и, как следствие, их емкости. В результате полезное время разряда батареи ограничивается 1 часом полета или около того, и соответственно, с такой же периодичностью аккумулятор должен заряжаться.

Контактные способы зарядки аккумуляторов позволяют решить эту задачу практически без потерь энергии, однако включают в себя множество других значимых недостатков. Во-первых, частое механическое переключение зарядного разъема резко сокращает срок его службы. Во-вторых, механическое соединение аккумулятора и системы зарядки требует либо присутствия человека на зарядной станции, либо автоматической системы высокоточной посадки БПЛА на стол зарядной станции. Иногда эти подходы могут не реализоваться в принципе, например, при обслуживании БПЛА в пустыне. Также необходимо учитывать, что чистота поверхностей электрических контактов должна быть безупречной.

Беспроводная зарядка аккумуляторов лишена перечисленных проблем, а зарядка аккумулятора любой транспортной систе-

мы может осуществляться в автоматическом режиме. Современный подход к беспроводной зарядке аккумуляторов мобильных телефонов и других современных гаджетов предполагает использование так называемого стандарта Qi<sup>1</sup>. Этот стандарт подразумевает использование магнитной связи между плоскими катушками индуктивности, которая возникает при относительно низких рабочих частотах, десятки и сотни килогерц. Однако этот способ передачи энергии характеризуется чрезвычайно малым рабочим расстоянием между элементами системы передачи энергии. Эффективная передача энергии происходит практически при полном контакте плоских катушек. При расстоянии между катушками уже в 3–5 мм передача энергии практически полностью прекращается.

Работа устройства с увеличенным рабочим расстоянием, основанная на принципе магниторезонансной передачи энергии, описана в [1–3]. По мнению авторов, передача энергии может осуществляться изотропно и на значительные расстояния, достигающие нескольких метров. Однако работа такого устройства небезопасна для живых организмов в непосредственной близости от беспроводной системы передачи энергии, особенно если уровень мощности передаваемого излучения повышен до нескольких ватт и более.

Другой подход к беспроводной передаче энергии описан в [4; 5]. По описанию автора, такое устройство состоит из двух магнитных антенн, каждая из которых состоит из двух спиралей, намотанных в разные стороны. В результате такая антенна не излучает электромагнитную энергию, находясь в свободном пространстве. Поле, излучаемое отдельно спиралями, взаимно компенсируется; излучение энергии при этом отсутствует. При наличии такой магнитной антенны в непосредственной близости к второй подобной в одной плоскости между этими магнитными антеннами возникает сильная магнитная связь и передается энергия. Рабочее расстояние такой системы, по утверждению авторов, может достигать нескольких сантиметров и более. К сожалению, в статьях не приводятся данные о практической реализации этого метода и не приводятся результаты моделирования работы таких устройств. Дальнейшее развитие этого направления этими авторами не велось, несмотря на его очевидную перспективность; по крайней мере, невозможно было отследить исследования в этой области. Кроме того, сами

<sup>1</sup> Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging» (Electronics resource). Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qistandard-powers-up-wireless-charging-102043348.html> ; Guidelines for Automotive Aftermarket Qi / Chargers The Wireless Power Consortium 2012 2012/10/01.

устройства, судя по чертежам, приведенным в работах, довольно сложны в изготовлении.

## Новый подход к проблеме

Основная цель исследований, описанных в данной статье, – упрощение конструкции элементов беспроводной системы передачи энергии, снижение непроизводительных потерь энергии из-за ее излучения в свободное пространство и потерь в фидерах и конструктивных элементах генерирующих устройств, а также снижение вредного влияния энергии высокочастотного излучения на людей и другие биологические объекты, расположенные в непосредственной близости от системы беспроводной передачи энергии.

Предлагается использовать полосковую технологию для беспроводной передачи энергии. Представляют интерес два типа полосковых структур. Первый вид – это асимметричная или микрополосковая структура. Для этого типа структуры электромагнитное поле сосредоточено исключительно между микрополосковой линией с ее внутренней стороны и заземляющей пластиной. Второй тип включает структуру симметричных полосковых линий, в которой электромагнитное поле сосредоточено между обеими сторонами полосковой линии и обеими заземляющими пластинами. Обе конструкции имеют незначительные потери электромагнитной энергии и не излучают электромагнитную энергию в свободном пространстве.

При этом направленные ответвители с приемлемыми параметрами качества могут быть реализованы на симметричной полосковой линии; и лучший результат получается, если организовать лицевую связь между входными и выходными полосками. В любом случае в структуре возможна передача энергии только от одной полосковой линии в другую. Это свойство структуры, связанной с симметричной полосковой линией, может использоваться для беспроводной передачи энергии.

Таким образом, система передачи энергии состоит из двух симметричных идентичных частей, каждая из которых представляет собой асимметричную микрополосковую линию передачи определенной длины, закороченную или разомкнутую на одном конце и возбужденную с другого конца. Для предотвращения непроизводительных потерь энергии в конструкциях не используются согласованные нагрузки 50 Ом (или любое другое сопротивление) [6]. Структуры из полосковых линий передачи практически не излучают электромагнитную энергию в свободное пространство; это хорошо известный факт [7]. Таким образом, непроизводительные потери энергии отсутствуют.

## Моделирование системы передачи энергии

Структура полосковых линий была смоделирована в среде проектирования AWR DE. Модель конструкции представлена на рис. 1.

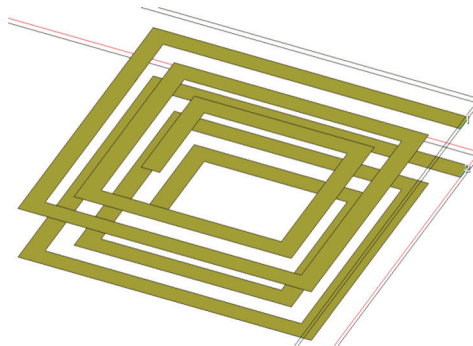


Рис. 1. Модель узла передачи энергии в AWR DE  
Fig. 1. Model of a power transmission unit in AWR DE

Для экономии места обе микрополосковые линии были свернуты в спирали, причем симметрично. Микрополосковые линии были оставлены свободными с одного конца. С другого конца микрополосковые линии оканчивались портами 50 Ом (1 и 2). Первая линия возбуждалась через порт 1; анализировалась энергия на выходе второй линии, через порт 2.

Микрополосковые линии помещались на диэлектрические подложки. В качестве диэлектрического материала использовался поликарбонат, диэлектрическая проницаемость которого  $\varepsilon = 3,9$  и потери  $\text{tg}\delta = 0,005$ . Толщина подложек составляла 5 мм. Расстояние между полосками в процессе моделирования изменялось от 5 мм до 30 мм.

Внутренний диэлектрик (между полосковыми линиями) представлял собой воздух с диэлектрической проницаемостью 1. Общая длина обеих полосковых линий составляла около 1,6 м, ширина полосковых линий составляла 10 мм, а их толщина составляла 35 мкм. Размер обеих заземляющих плоскостей (токопроводящих подложек) составлял  $220 \times 220 \text{ мм}^2$  толщиной 35 мкм.

Результаты моделирования электромагнитной структуры для расстояния между полосковыми линиями 10 мм показаны на рис. 2.

На этом рисунке показаны три графика: обратные потери (синие треугольники), переходное затухание (красные квадраты) и коэффициент стоячей волны напряжения, КСВН (зеленые ромбы).

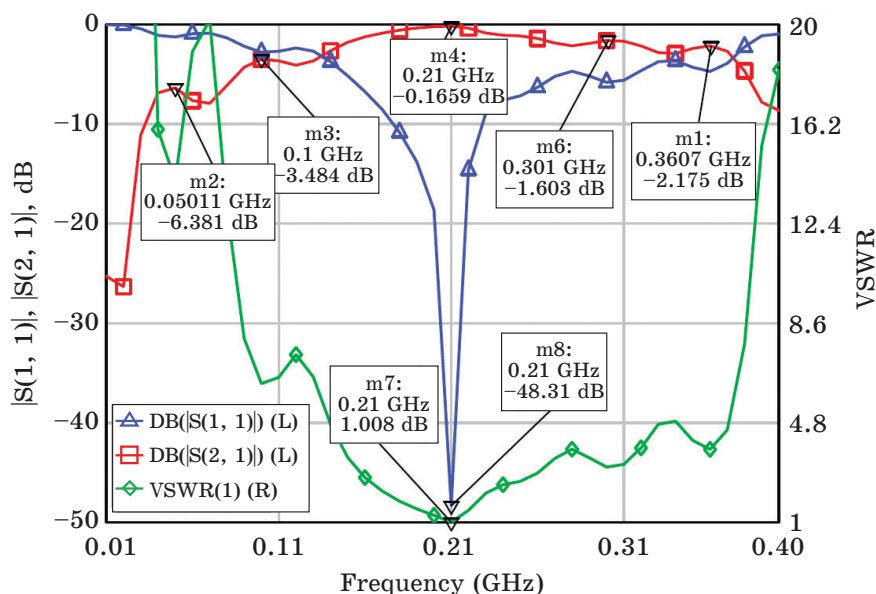


Рис. 2. Результаты моделирования в AWR DE

Fig. 2. Results of simulation in AWR DE

Очевидно, что наблюдались несколько максимумов передачи энергии в диапазоне частот. Первый максимум соответствует основной частоте (четверть длины волны в полосковой линии). Остальные максимумы соответствуют частотам, кратным основной частоте. Как видно, переходное затухание на основной частоте (50 МГц) достигает значения в  $-6,4$  дБ, а на удвоенной частоте (100 МГц) затухание снижается до  $-3,5$  дБ. Затухание достигает минимума  $-0,17$  дБ на частоте 210 МГц (длина полосы в четыре четверти длины волны).

Очевидно, что полученные затухания нельзя квалифицировать как непродуктивные потери энергии. В наилучшей точке (210 МГц) КСВ имеет значение 1,008 (обратные потери  $-48,3$  дБ). Совершенно объективно можно сказать, что эффективность передачи энергии в этом случае высока. При этом затуханием энергии на расстоянии в 10 мм можно пренебречь (в сравнении с 3 мм расстоянием для передачи энергии для стандарта Qi).

### Экспериментальные исследования

Изготовлены две микрополосковые линейные структуры как фрагменты беспроводной системы передачи энергии и проведены предварительные экспериментальные исследования. Фотография структуры микрополосковой линии представлена на рис. 3. Медная полоска приклеена к поликарбонату.



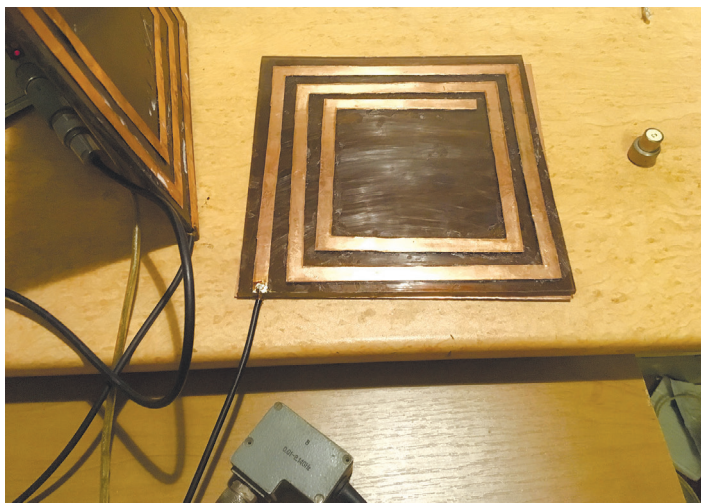


Рис. 3. Внешний вид микрополосковой структуры

Fig. 3. Appearance of the microstrip structure

Толщина полосковых линий составляла 0,3 мм (больше, чем при моделировании). В качестве заземляющего слоя использовался фольгированный двусторонний стеклотекстолит марки FR-4 с толщиной диэлектрика в 1 мм и толщиной меди 35 мкм с обеих сторон. Электрическое соединение между медными сторонами FR-4 было емкостным (очевидно, неидеальное решение). Эта комбинированная заземляющая пластина также была приклеена к поликарбонату.

Как видно на фото, конструкция микрополосковой структуры была несовершенной, поскольку изготовление велось вручную.

Для анализа использовался измеритель КСВН и ослабления Р2-102 (производство СССР). Сначала было установлено расстояние между полосковыми линиями 10 мм, которое использовалось при моделировании. Это расстояние выдерживалось пузырчатым двухслойным полиэтиленом, каждый слой был порядка 6 мм. Диэлектрическая проницаемость этого материала была принята равной 1. Необходимое расстояние устанавливалось путем прикладывания внешней нагрузки на «сэндвич» (два мощных трансформатора на 50 Гц). При этом полиэтилен деформировался до определенной толщины.

Экспериментальная установка показана на рис. 4. С помощью металлического уголка (справа) измерялось расстояние.

Диапазон частот был установлен от 10 МГц до 400 МГц (как в моделировании). На экране измерителя показаны две кривые. Верхняя кривая – КСВН первой микрополосковой структуры (показания цифрового индикатора слева верхнего изме-

рительного блока). Нижняя кривая – коэффициент передачи энергии (показания цифрового индикатора справа верхнего измерительного блока).

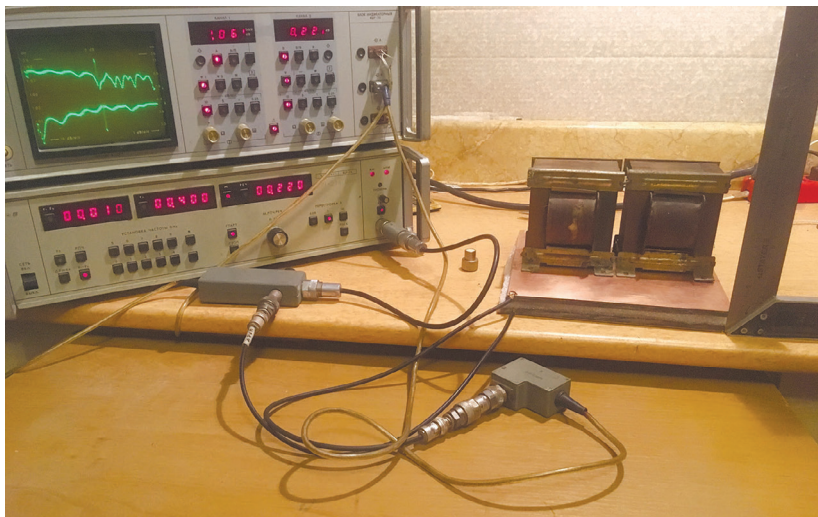


Рис. 4. Внешний вид испытательного стенда

Fig. 4. Appearance of the test bench

Как видно на рис. 4, кривая передачи энергии носит колебательный характер. Затухание передаваемой энергии составило 0,22 дБ на частоте 220 МГц (маркер). Те же кривые, но с маркерами на частотах 49 МГц и 115 МГц показаны на рис. 5 (показания крайнего правого цифрового индикатора нижнего измерительного блока).

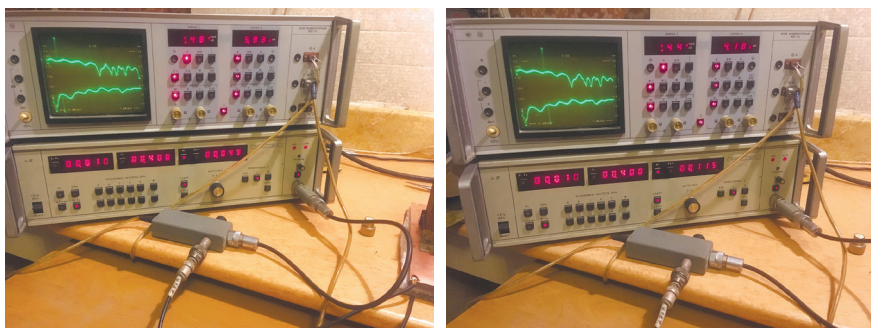


Рис. 5. Измерения на частотах 49 МГц и 115 МГц

Fig. 5. Measurements at 49 MHz and 115 MHz

Затухание при передаче энергии составило 5,93 дБ на частоте 49 МГц и 4,18 дБ на частоте 115 МГц (показания правого цифрового индикатора верхнего измерительного блока). Все полу-



ченные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования.

Далее были проведены измерения для расстояния между полосковыми структурами приблизительно 6 мм. Результаты измерений представлены на рис. 6.

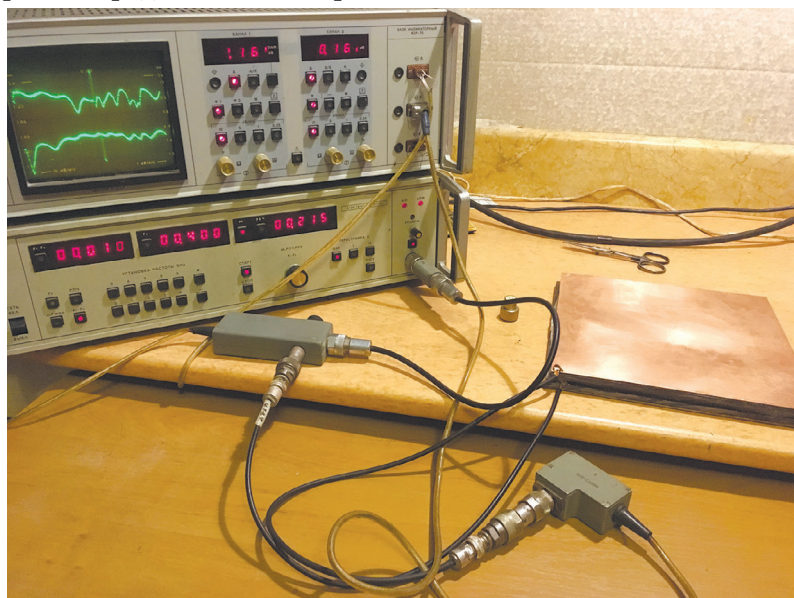


Рис. 6. Измерения при расстоянии между структурами 5 мм

Fig. 6. Measurements at a distance between structures in 5 mm

Как видно, ситуация принципиально не изменилась, и на той же рабочей частоте в 215 МГц затухание снизилось до 0,16 дБ. Другими словами, для передачи энергии не имеет значения установка расстояния между микрополосковыми структурами в пределах 5–10 мм. В любом случае затуханием при передаче энергии можно пренебречь.

### Дополнительные мероприятия

Передача энергии имеет смысл, пока присутствует потребитель энергии. В других случаях (транспортное устройство удалось, и вторая микрополосковая структура переместилась далеко) постоянное возбуждение первой микрополосковой структуры приведет к непродуктивным потерям энергии. Потери энергии за счет излучения в свободное пространство не учитываются. Для уменьшения непроизводительных потерь энергии предлагается измерять КСВН первой микрополосковой структуры и изменять режим работы высокочастотного генератора, как это показано на рис. 7 [6].

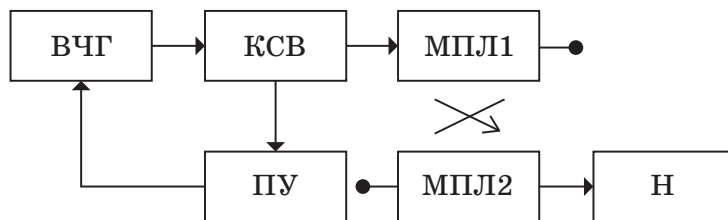


Рис. 7. Структурная схема системы передачи энергии

Fig. 7. Block diagram of the power transmission system

Система беспроводной передачи энергии состоит из высокочастотного генератора (ГВЧ), измерителя коэффициента стоячей волны напряжения (КСВ), порогового устройства (ПУ), первой микрополосковой линии (МПЛ1), второй микрополосковой линии (МПЛ2) и нагрузки (Н).

Сначала ГВЧ генерирует высокочастотные колебания малой мощности. Эти высокочастотные колебания проходят через измеритель КСВ и попадают на первый вывод МПЛ1. Второй вывод МПЛ1 оставлен свободным, что обеспечивает полное отражение от этого вывода высокочастотных колебаний, распространяющихся от его первого вывода ко второму. При этом непродуктивные потери энергии в самой МПЛ1 отсутствуют. При отсутствии МПЛ2 вся энергия высокочастотного сигнала отражается от свободного конца МПЛ1 и возвращается в ГВЧ через измеритель КСВ. На выходе измерителя КСВ формируется уровень напряжения, пропорциональный коэффициенту стоячей волны. Это напряжение сравнивается в ПУ с определенным пороговым уровнем, характеризующим пороговое значение коэффициента стоячей волны. Когда это напряжение превышает заданный пороговый уровень, ПУ формирует на своем выходе соответствующий сигнал управления, подаваемый на вход ГВЧ. При высоком значении КСВ управляющий сигнал оставляет ГВЧ в режиме генерации маломощного сигнала.

При приближении к первой МПЛ1 другой микрополосковой структуры (МПЛ2) часть высокочастотной энергии переходит от МПЛ1 к МПЛ2. При этом высокочастотные колебания распространяются в МПЛ2 от его второго вывода к первому, и энергия этих высокочастотных колебаний попадает в нагрузку Н.

Другая часть энергии, которая не прошла от МПЛ1 к МПЛ2, распространяется в МПЛ1 в направлении ее второго вывода, где высокочастотные колебания полностью отражаются и распространяются дальше от ее второго вывода к первому. Часть энергии этих колебаний также поступает в МПЛ2, где высокочастотные колебания распространяются уже от ее (МПЛ2) пер-

вого вывода ко второму. Отразившись от ее свободного второго конца, высокочастотные колебания распространяются в сторону первого конца МПЛ2 и попадают в нагрузку Н. В результате этого многократного взаимодействия происходит повышение уровня передачи энергии от МПЛ1 к МПЛ2.

На рабочей частоте системы при приближении микрополосковых структур друг к другу обратные потери снижаются. Когда они падают ниже уровня  $-10$  дБ, что соответствует уменьшению коэффициента стоячей волны ниже 2, это значение можно принять равным пороговому. В этом случае пороговое устройство ПУ переключает ГВЧ в режим максимальной мощности, тем самым обеспечивая эффективную передачу энергии высокочастотных колебаний от ГВЧ к нагрузке.

Непроизводительные потери энергии высокочастотных колебаний в этом случае сведены к минимуму. Другой аспект повышения эффективности использования описанного подхода связан с исключением вредного воздействия высокочастотной энергии на человека и другие биологические объекты, которые находятся в непосредственной близости от системы беспроводной передачи энергии. Когда две микрополосковые линии объединяются в один направленный ответвитель на симметричных полосковых линиях с лицевой связью, излучение высокочастотной энергии в свободное пространство почти полностью отсутствует и не оказывает влияния на людей и другие биологические объекты. При удалении второй микрополосковой линии достаточно далеко вредное воздействие на биологические объекты также отсутствует. Это связано с тем, что микрополосковая линия передачи также имеет небольшое паразитное излучение энергии сигнала, распространяющееся в ней, с одной стороны. С другой – при отсутствии второй связанной микрополосковой линии передачи коэффициент стоячей волны в первой микрополосковой линии передачи становится большим. Когда этот коэффициент превышает определенное пороговое значение, уровень высокочастотных колебаний мощности, создаваемых ГВЧ, снижается до чрезвычайно малой величины, которая полностью безопасна для человека, даже если принять во внимание его полное излучение в свободное пространство. Эта низкая мощность устанавливается на уровне, необходимом и достаточном для измерения коэффициента стоячей волны в МПЛ1.

Помимо отсутствия вредного воздействия на биологические организмы, в последнем случае происходит значительная экономия энергии, так как ГВЧ в режиме малой мощности также характеризуется небольшими непродуктивными потерями.

## Заключение

Таким образом, представлена система передачи энергии для беспроводной зарядки аккумуляторов БпЛА. Система состоит из двух микрополосковых структур, соединенных лицевыми сторонами. Система обеспечивает передачу энергии на разумных расстояниях между микрополосковыми структурами. Так, на расстоянии до 10 мм между полосками переходное затухание не превышает значения в 0,2 дБ. Это незначительное затухание имеет место на любом рабочем расстоянии в пределах 5–10 мм. Использование спиральных микрополосковых линий существенно уменьшает размер электромагнитных структур и открывает широкие возможности по снижению требований по взаимному расположению элементов зарядной системы.

Экономический эффект от использования предложенного подхода связан с появлением возможности эффективно с минимальными потерями передавать энергию высокочастотного сигнала генератора на нагрузку без проводов.

Конструкция устройства, реализующего данный метод беспроводной передачи энергии, предельно проста. Излучение высокочастотной энергии в свободное пространство практически полностью отсутствует и не оказывает влияния на человека и другие биологические объекты, находящиеся в непосредственной близости от системы беспроводной передачи энергии.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Севастопольского региона, проект № 20-48-920001.

## Acknowledgments

The research is carried out with the financial support of the RFBR and the Sevastopol region, project № 20-48-920001.

## Список литературы

1. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 2007;317(5834):83–866. DOI: 10.1126/science.1143254.
2. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless *non-radiative mid-range* energy transfer. *Annals of Physics*, 2008;323(1):34–48. DOI: 10.1016/j.aop.2007.04.017.
3. Hadley F. *Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords.* June 7, 2007. Available at: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>

4. Pchelnikov Yu. N. Features of slow waves and potential for their nontraditional application. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2003;48(4):494–507.

5. Pchelnikov Yu. N., Yelizarov A. A., Pchelnikov A. G. Wireless charging mechanism for outdoor appliance. In: *IEEE Proc. 23<sup>rd</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9–13 September 2013*, pp. 1058–1059.

6. Широков И. Б. *Способ беспроводной передачи электрической энергии высокой частоты*. Патент на изобретение № 2704602 С1 Россия. МПК H02J 50/00, СПК H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08. Опубл. 30.10.2019. Бюл. № 31.

7. Вольман В. И., Пименов Ю. В. *Техническая электродинамика*. М.: Связь; 1971. 487 с.

## References

1. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 2007;317(5834):83–866. DOI: 10.1126/science.1143254.

2. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless *non-radiative mid-range* energy transfer. *Annals of Physics*, 2008;323(1):34–48. DOI: 10.1016/j.aop.2007.04.017.

3. Hadley F. *Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords*. June 7, 2007. Available at: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>

4. Pchelnikov Yu. N. Features of slow waves and potential for their nontraditional application. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2003;48(4):494–507.

5. Pchelnikov Yu. N., Yelizarov A. A., Pchelnikov A. G. Wireless charging mechanism for outdoor appliance. In: *IEEE Proc. 23<sup>rd</sup> International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9–13 September 2013*, pp. 1058–1059.

6. Shirokov I. B. *Method for wireless transmission of high-frequency electrical energy*. Patent for invention No. 2704602 C1 Russia, IPC H02J 50/00, CPC H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08, Publ. 30.10.2019,. Bul. No. 31.

7. Volman V. I., Pimenov Yu. V. *Technical electrodynamics*. Moscow: Communication, 1971. 487 p.

## Информация об авторах

**Широков Игорь Борисович**, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6425-5385, [shirokov@ieee.org](mailto:shirokov@ieee.org)



**Сердюк Игорь Владимирович**, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация, serdyuk@ieee.org

**Азаров Андрей Андреевич**, аспирант Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация, azarov@ieee.org

**Широкова Елена Игоревна**, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация, shirokova@ieee.org

### Information about the authors

**Igor B. Shirokov**, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6425-5385, shirokov@ieee.org

**Igor V. Serdyuk**, associate professor Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, serdyuk@ieee.org

**Andrey A. Azarov**, graduate student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, azarov@ieee.org

**Elena I. Shirokova**, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, shirokova@ieee.org

Поступила / Received: 15.02.2021

Принята в печать / Accepted: 10.03.2021